黄土丘陵区覆沙坡面产流产沙过程及水沙关系

苏远逸[1,2]， 冯朝红[3]， 张 扬[1]， 雷 娜[1]， 张庭瑜[1]

（1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司，陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司，国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室，陕西省土地整治工程技术研究中心，陕西 西安 710075；2. 西安理工大学水利水电学院，陕西 西安 710048；3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003）

摘 要：通过室内放水冲刷试验，对4种覆沙条件和3种径流坡长条件下的产流产沙过程及水沙关系特征进行了研究。结果表明：覆沙坡面的初始产流时间相比于黄土坡面明显延长，初始产流时间随着覆沙厚度的增加而增大，且产流量和产沙量峰值出现的时间存在不同步性。不同坡面的产流率在试验初期较小，随着产流历时的延长逐渐增大并且趋于稳定。黄土坡面的产沙率随产流历时的延长变化趋势较为平稳，覆沙坡面的产沙率波动范围较大。不同坡面的累积产沙量均随着累积产流量的增加而逐渐增大，并且两者之间呈幂函数关系。由于沙层具有一定的蓄水功能，导致覆沙坡面的侵蚀过程明显不同于黄土坡面，覆沙厚度是影响坡面侵蚀特征的重要因子，该研究为进一步揭示复合坡面的侵蚀特征提供科学依据。

关键词：黄土；覆沙坡面；产流产沙；水沙关系

黄土高原北部的风蚀水蚀交错带受夏秋季水蚀与冬春季风蚀的共同作用，冬春季的强风将大量的风沙输送到黄土坡面、沟壑和河道中。这就形成了一种特殊的地貌景观，即风沙覆盖黄土坡面[1-3]。许炯心[4]经过多年野外调查发现，风沙覆盖黄土区面积约13099 km^2，位于多沙粗沙区北部，约占该区域的17%。沙土在汛期容易被侵蚀，随后沿黄河被径流输送到黄河下游的河床上，水土流失率超过10000 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$[5]。造成这种现象的主要原因是由于风力与水力的耦合作用。风力作用将大量粗泥沙颗粒搬运到坡面、沟壑和河道中，为高含沙水流的形成提供了充足的物质来源[6]。水力作用是搬运粗泥沙颗粒的动力条件，最终形成了富含细颗粒的高含沙水流[7]。风力作用和水力作用在时间上相互交错，在空间上互相重叠，导致该地区水土流失率较高。严重的水土流失使当地脆弱的生态环境进一步恶化，给当地人们正常的生产生活造成巨大危害，不利于黄河下游生态环境的可持续发展[8-11]。

张丽萍等[12-13]通过野外模拟降雨试验指出覆沙黄土坡面是"入渗-水流-崩塌"的特殊侵蚀模式，产流产沙与黄土坡面相比滞后，但产流后的产沙量随着径流量的增大明显增大。惠振江[14]得到与张丽萍相同的结论，这是由于黄土和风沙土的入渗率不同造成的。风沙土粗颗粒含量较高，土壤孔隙度较大，导致入渗率高，而黄土与之相反。因此，对于覆沙黄土坡面而言，沙层中的水分迅速入渗到达沙土界面，由于黄土的入渗率较低，一部分水分入渗至黄土中，其余水分在重力作用下沿着沙土界面向下流动。随着降雨时间的延长，坡面整个沙缘不断被侵蚀后退，径流将泥沙向坡下搬运输移[15]。覆沙黄土坡面一般难以形成地表径流，在持续强降雨条件下坡面产生径流后会形成高含沙水流[16]。在坡面尺度上，Zhang等[17]通过研究发现，由于沙层的存在改变了侵蚀模式，并且还存在临界覆沙厚度。谢林妤等[18]的研究表明，覆沙厚度、颗粒大小及其相互作用对产流产沙量影响很大。

针对黄土区覆沙坡面侵蚀过程的初步研究表明，黄河下游出现的高含沙水流和沉积在黄河下游河床上较粗的泥沙颗粒是由于覆沙黄土区严重的水土流失造成的[19]。目前，关于黄土区侵蚀过程的研究大多集中在单一黄土坡面，而对于定量研究黄土区覆沙坡面侵蚀过程所开展的研究较少。因此，

收稿日期：2022-01-04； **修订日期**：2022-03-21
基金项目：陕西省自然科学基础研究计划项目（2022JQ-509、2021JQ-961）
作者简介：苏远逸（1993-），男，博士，主要从事土壤侵蚀和水土保持方面的研究. E-mail: suyuanyi666@163.com

为了探究黄土区覆沙坡面的产流产沙过程及水沙关系,本研究以覆沙坡面作为主要研究对象,以黄土坡面作为参照,对比分析不同坡面的侵蚀差异,以期为完善黄土区覆沙坡面的侵蚀机理提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验用土选取陕西省榆林市绥德县王茂沟小流域的黄绵土和内蒙古自治区达拉特旗东柳沟小流域的风沙土。将试验用土运回实验室后过10 mm土样筛去除草根、砾石等杂质。经Mastersizer 2000测得黄土颗粒组成为黏粒(<0.002 mm)0.17%、粉粒(0.002~0.05 mm)61.22%和砂粒(>0.05 mm)38.31%,风沙土颗粒组成为黏粒(<0.002 mm)0.72%、粉粒(0.002~0.05 mm)14.38%和砂粒(>0.05 mm)84.9%(表1)。经测定黄土干密度约为1.25 g·cm^{-3},风沙土干密度约为1.65 g·cm^{-3}。

图1为冲刷试验装置示意图,由径流收集装置、土槽、水槽、稳流槽、水箱和阀门等组成。土槽(长2 m,深0.2 m,宽0.2 m)为木质土槽,设置为12°的斜坡。在土槽顶部连接一个宽0.2 m、深0.05 m的变坡长水槽,坡长分别为2 m、4 m和6 m。稳流槽采用带孔的有机玻璃板分为两部分,稳流槽中的水来自装有流量控制器的水箱,水箱设有排水孔,以保持水压稳定。

表1 试验土壤颗粒组成

Tab. 1 Grain composition of experimental loess soil

试验土壤	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(>0.05 mm)
黄绵土	0.17	61.22	38.31
风沙土	0.72	14.38	84.9

1.2 试验设计与方法

室内放水冲刷试验在西安理工大学雨洪侵蚀大厅内进行。试验设计放水强度为1 L·min^{-1}[20],根据野外现场调查结果和已有研究成果,黄土高原50%以上坡耕地的坡度在10°~15°之间,因此该试验设计的坡度为12°。将野外采回的土样称重并烘干,根据计算结果设定黄绵土的土壤前期含水量为15%,土壤干容重为1.25 g·cm^{-3}。选用覆沙条件和径流坡长2个影响因子,设计4个覆沙条件(0 cm,1 cm,2 cm,3 cm)和3种径流坡长(2 m,4 m和6 m)进行组合试验,每组试验重复3次,共36场试验,试验结果采用3次试验结果的平均值,具体冲刷试验设计如表2所示。

将试验用土运回实验室后进行装填,共分为以下几个步骤:(1)土壤风干并过10 mm的土样筛,除去植物根、小石块等杂质;(2)取适量土样测量其含水率,用喷壶洒水混合均匀使含水量达到15%左右,并用塑料膜覆盖防止水分蒸发;(3)根据测定野外黄土的干容重(1.25 g·cm^{-3})计算得出需要的用土量,将配置好的黄土每5 cm装入土槽中,一共4层,每层黄土装填压实后在表面进行浅锄,保证土壤紧密结合;(4)根据试验设计要求在需要覆沙的坡面覆盖不同厚度的风沙土,覆沙坡面在装土时表层预留相应的位置,保证每场试验填土厚度一致;(5)用喷壶在覆沙坡面喷洒适量的水,让沙层的含水量接

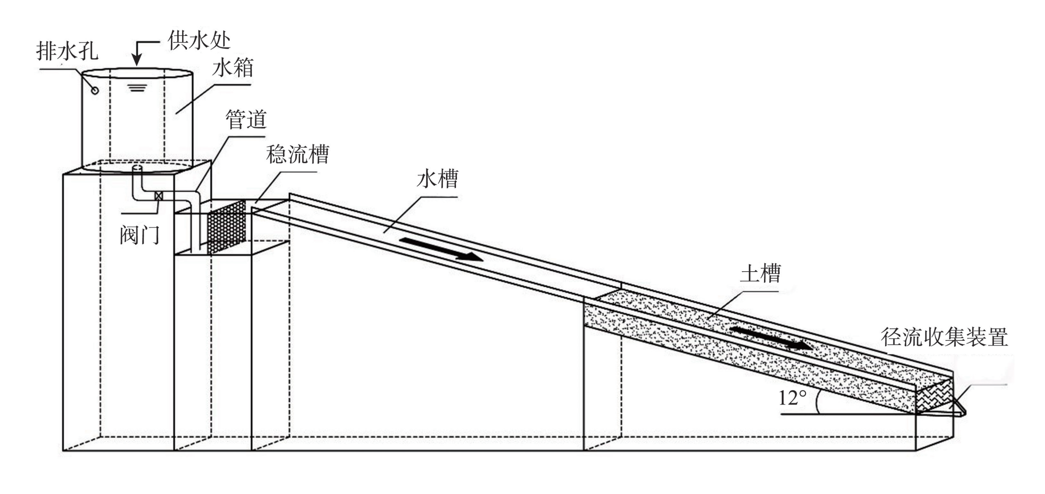


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

表2　冲刷试验设计

Tab. 2　Design table of scour experimental

径流坡长/m	覆沙条件/cm	试验编号	坡面类型	流量/(L·min^{-1})	产流历时/min	坡度/(°)	初始土壤含水量/%	土壤容重/(g·cm^{-3})
2	0	U20	黄土坡面	1	15	12	15.78	1.27
	1	U21	覆沙坡面	1	15	12	14.38	1.29
	2	U22		1	15	12	15.76	1.27
	3	U23		1	15	12	15.45	1.25
4	0	U40	黄土坡面	1	15	12	16.61	1.21
	1	U41	覆沙坡面	1	15	12	15.81	1.27
	2	U42		1	15	12	15.95	1.21
	3	U43		1	15	12	15.30	1.20
6	0	U60	黄土坡面	1	15	12	15.65	1.22
	1	U61	覆沙坡面	1	15	12	16.96	1.24
	2	U62		1	15	12	14.72	1.22
	3	U63		1	15	12	15.86	1.23

近野外状态。

试验开始前先率定冲刷流量，在率定值连续3次与设计流量之间的误差小于5%时进行冲刷试验。水流进入土槽后到径流收集装置出现径流的时间为初始产流时间，径流收集装置出现径流开始后记录产流时间，产流持续15 min后关水。在试验过程中，当径流收集装置出现径流后用容量瓶接取每分钟内的泥沙样品，保证容量瓶内装满，剩余的泥沙水样用带有刻度的塑料桶收集。试验结束后记录塑料桶中浑水的体积，并将容量瓶中的泥沙样品静置24 h，倒去上层清液后将剩余的泥沙样品转移至钢制饭盒中，放进105 ℃的烘箱中12 h，随后用电子秤称量得到广口瓶中的泥沙质量。用容量瓶中的泥沙质量与容量瓶的容积相比得到含沙量，再根据塑料桶中记录的浑水体积换算得出试验过程中每分钟的产沙量，最后用浑水总体积减去泥沙总体积得到产流量。

1.3　数据处理与分析

试验数据使用Excel进行统计，采用SPSS进行数据的描述性统计、方差分析、回归与相关分析、曲线拟合等，用Origin进行绘图，用Photoshop绘制了冲刷试验装置示意图。

2　结果与分析

2.1　覆沙坡面侵蚀过程特征值

表3为覆沙坡面侵蚀特征值统计表，主要包括初始产流时间、产流量峰值及出现时间、产沙量峰值及出现时间。由表3可以看出，黄土坡面的初始产流时间在0.53~0.66 min之间，覆沙坡面的初始产流时间在1.8~4.18 min之间。在相同覆沙条件下，初始产流时间随着径流坡长的增加而缩短。在相同径流坡长条件下，与黄土坡面相比，覆沙坡面的初始产流时间明显延长，并且初始产流时间随着覆沙厚度的增加而延长。

黄土坡面的产流量峰值分别为774.5 mL(U20)、759.7 mL(U40)和734.9 mL(U60)，产沙量峰值为99.86 g(U20)、109.33 g(U40)和199.09 g(U60)，产沙量峰值随着径流坡长的增大明显增大。覆沙坡面的产流量峰值在832.43~987.88 mL之间，均大于黄土坡面的产流量峰值，产沙量峰值在470.51~971.17 g之间，并且在相同径流坡长条件下，随着覆沙厚度的增加产沙量峰值逐渐增大；黄土坡面的产流量峰值出现时间在10~15 min之间，产沙量峰值出现时间在9~15 min之间，产流量和产沙量峰值出现时间均较晚；覆沙坡面的产流量峰值出现时间依次为：U42<U21=U22=U2<U41<U43=U61=U62=U63，在11~15 min之间；而产沙量峰值出现时间依次为：U61<U22=U23<U43=U62=U63<U41<U21<U42，在1~11 min之间，产流量和产沙量峰值出现的时间存在不同步性，说明坡面在覆沙前后侵蚀过程发生了改变。

2.2　覆沙坡面产流产沙过程特征

2.1.1　*产流过程*　由图2可以看出，不同坡面产流率随产流历时的变化存在以下规律：试验初期的产

表3 覆沙坡面侵蚀特征值

Tab. 3 Characteristic values of runoff and sediment yield

特征值	试验编号											
	U20	U21	U22	U23	U40	U41	U42	U43	U60	U61	U62	U63
IRT/min	0.66	2.3	3.11	4.18	0.62	2.07	2.51	3.59	0.53	1.8	2.02	2.39
Q_{max}/mL	774.50	855.14	863.94	889.49	759.70	832.43	891.14	987.88	734.9	843.24	924.56	932.98
$Q_{max}T$/min	14	12	12	12	15	13	11	15	10	15	15	15
M_{max}/g	99.86	555.47	813.82	808.47	109.33	480.26	875.94	971.17	199.09	470.51	654.73	948.64
$M_{max}T$/min	15	10	7	7	9	9	11	8	14	1	8	8

注:*IRT*表示初始产流时间(min);Q_{max}表示产流量峰值(mL);$Q_{max}T$表示产流量峰值出现时间(min);M_{max}表示产沙量峰值(g);$M_{max}T$表示产沙量峰值出现时间(min)。

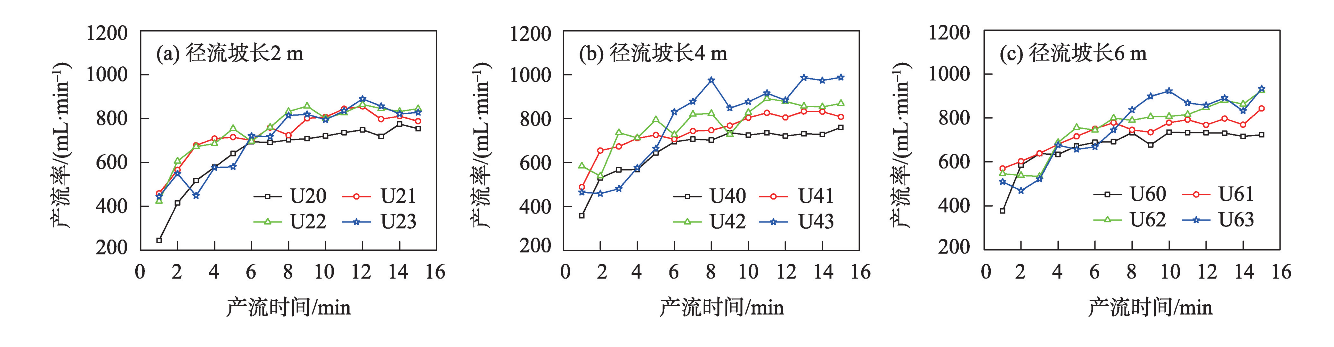


图2 覆沙坡面产流率随产流时间的变化

Fig. 2 Variation of runoff rate on sand covered slope with runoff time

流率都较小,随着产流历时的延长,产流率逐渐增大并且趋于稳定。黄土坡面的产流率随产流历时的变化大致分为2个阶段:第一阶段是0~6 min,产流率随着产流历时的延长呈迅速增加趋势;第二阶段是6~15 min,产流率随着产流历时的延长表现出稳定的变化趋势,产流率稳定在700 mL·min^{-1}左右。黄土坡面产流率的波动范围分别在245.23~774.5 mL·min^{-1}(U20)、357.44~759.7 mL·min^{-1}(U40)和376.13~734.9 mL·min^{-1}(U60)之间,产流率的变异系数(C_V)分别为22.14%(U20)、16.13%(U40)和13.41%(U60)。覆沙坡面的产流率随产流历时的变化也可分为两个阶段,分别是迅速增加阶段和相对稳定阶段,但是在相对稳定阶段产流率的波动程度大于黄土坡面,并且在覆沙条件下两个阶段的分界点略有不同,随着覆沙厚度的增大分界点逐渐推迟。不同径流坡长和覆沙条件下,覆沙坡面产流率的波动范围在423.51~987.88 mL·min^{-1}之间。覆沙坡面产流率的C_V大小为:U61<U41<U42<U21<U22<U62<U63<U23<U43,由此可以看出,在相同径流坡长条件下产流率的C_V随着覆沙厚度的增加而增大。

2.1.2 产沙过程 由图3可以看出,黄土坡面的产沙率随产流历时的延长变化趋势较为平稳,覆沙坡

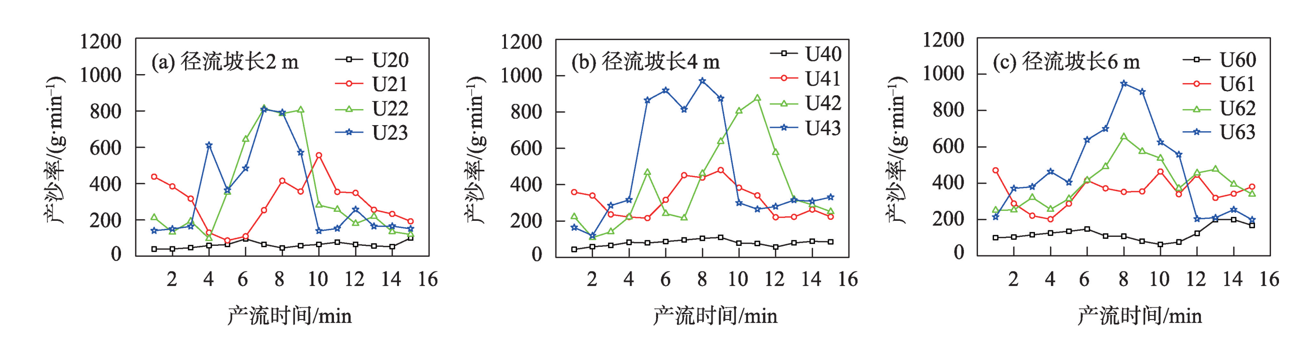


图3 覆沙坡面产沙率随产流时间的变化

Fig. 3 Variation of sediment yield on sand covered slope with runoff time

面的产沙率波动范围较大，并且变化趋势较为复杂。黄土坡面产沙率的波动范围分别在39.14~99.86 g·min^{-1}（U20）、43.49~109.33 g·min^{-1}（U40）和62.99~199.09 g·min^{-1}（U60）之间，其波动范围较小，产沙率的 C_V 分别为27.8%（U20）、21.74%（U40）和32%（U60）。对于覆沙坡面而言，当覆沙厚度为1 cm时，产沙速率随产流时间的延长呈先减小后增大再减小的趋势，在2 cm和3 cm覆沙厚度条件下，产沙速率随产流时间的延长呈先增大后减小并趋于稳定的规律。在不同覆沙厚度条件下，覆沙坡面产沙率的波动范围分别在86.24~555.47 g·min^{-1}（1 cm）、96.99~875.94 g·min^{-1}（2 cm）和119.84~971.17 g·min^{-1}（3 cm）之间，产沙率的波动范围随着覆沙厚度的增加而增大。覆沙坡面产沙率的 C_V 在22.17%~74.5%之间，大小为：U61<U41<U62<U21<U63<U42<U43<U23<U22，整体而言，覆沙坡面产沙率的 C_V 随着覆沙厚度的增加而增大。

2.3 覆沙坡面水沙关系

累积产流量与累积产沙量之间的关系可以对坡面侵蚀过程中水沙之间的动态关系进行定量反映，图4是不同径流坡长和覆沙条件下的坡面累积产流量与累积产沙量关系图。由图4可以看出，不同坡面的累积产沙量均随着累积产流量的增加而逐渐增加，两者之间呈幂函数关系：

$$S = AQ^B$$

式中：S 为累积产沙量(kg)；Q 为累积产流量(L)；A、B 为回归参数。

累积产流量和累计产沙量的拟合系数 R^2 均在0.9以上（表4）。结合函数关系以及本研究中对坡面侵蚀的影响因素，可以看出回归参数 A 和 B 均为产流产沙过程中的指示参数，定义参数 A 为产流能力系数，参数 B 为产沙速率系数，A 和 B 的大小均取决于坡面的覆沙情况，在本研究中黄土坡面的 A 和 B 均小于覆沙坡面。

3 讨论

覆沙黄土区的土壤剖面在黄土层和风沙土层之间有明显的边界，与黄土相比理化性质差别很大，导致覆沙黄土坡面的侵蚀过程与黄土坡面差别很大[9]。在本研究中覆沙坡面的初始产流时间是黄土坡面的3.35~6.36倍，覆沙坡面的初始产流时间明

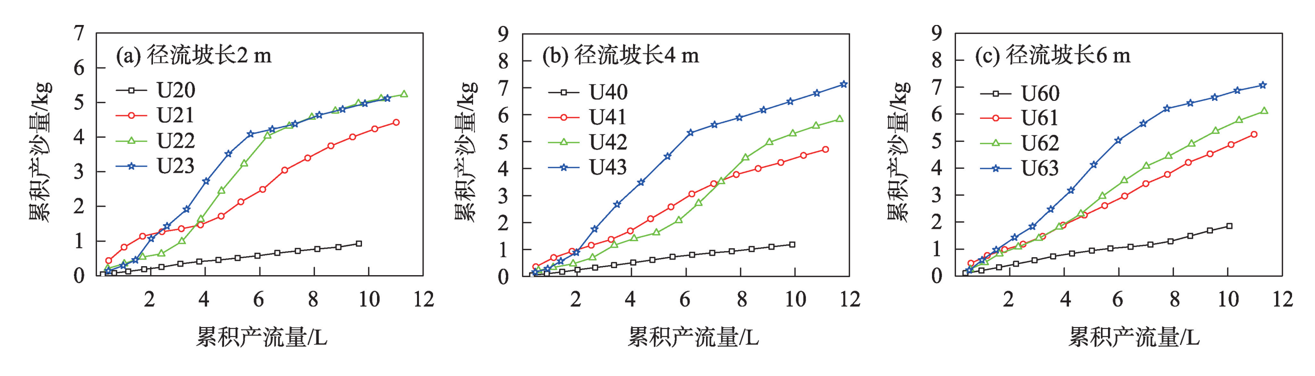


图4 不同覆沙条件下坡面累积产流量与累积产沙量关系

Fig. 4 Relationship between cumulative runoff and cumulative sediment yield on slope under different sediment cover conditions

表4 累积产流量和累积产沙量关系

Tab. 4 Relationship between cumulative runoff and cumulative sediment yield

试验编号	拟合公式	试验编号	拟合公式	试验编号	拟合公式
U20	S=0.1204$Q^{0.8841}$ R^2=0.9984	U40	S=0.1204$Q^{1.0148}$ R^2=0.9961	U60	S=0.2227$Q^{0.8804}$ R^2=0.9864
U21	S=0.7065$Q^{0.9261}$ R^2=0.9663	U41	S=0.5871$Q^{1.165}$ R^2=0.9895	U61	S=0.6323$Q^{1.153}$ R^2=0.9925
U22	S=0.3744$Q^{1.1438}$ R^2=0.9365	U42	S=0.4231$Q^{1.2648}$ R^2=0.9134	U62	S=0.5731$Q^{1.1318}$ R^2=0.9524
U23	S=0.3851$Q^{1.2206}$ R^2=0.8996	U43	S=0.2875$Q^{1.2138}$ R^2=0.981	U63	S=0.4629$Q^{1.0805}$ R^2=0.9944

显延长,这与张丽萍等[12-14]的研究结果大致相同。这是由于黄土的细颗粒含量较高,土壤孔隙度较小,并且在实验过程中坡面易形成地表结皮,坡面入渗率低导致径流在坡面迅速汇集流出,因此初始产流时间较短。覆沙坡面的初始产流时间比黄土坡面大大延长,主要有以下几点原因:(1)覆沙坡面的沙层孔隙度较大,导水性较强,其入渗率明显大于黄土层,在试验过程中沙层储存大量的水分,延缓产流,导致初始产流时间大大延长;(2)渗流流速远小于地表径流的流速,并且沙层中的水分需要达到一定的水力坡度后才能产流,最终导致初始产流时间延长;(3)随着覆沙厚度的增加,需要湿润沙层的水量和沙层中储蓄的水量增大,使初始产流时间明显延长[15]。除此之外,随着坡面覆沙厚度的增加,水分在沙层中的运移过程变得更加复杂,水分运移过程中伴随着偶然性和随机性,这些原因都可能导致初始产流时间的变化规律出现较大的变动。

黄土坡面和覆沙坡面产流率随产流历时的变化均可分为迅速增加和相对稳定两个阶段,但分界点略有不同,并且覆沙坡面在相对稳定阶段产流率的波动程度大于黄土坡面。这与汤珊珊等[15]的研究大致相同,在该研究中,产流后的前10 min内不同覆沙厚度下的径流量逐渐增大,在10 min以后,径流量随产流时间的变化表现为在一定范围内稳定地波动,并且随着沙层厚度的增加波动越明显。这是由于覆沙坡面的沙层具有蓄水能力引起的,在试验过程中覆沙坡面的产流方式明显不同于黄土坡面,覆沙坡面的沙层在坡面产生径流前储蓄水分,当蓄水量达到饱和后在出口处随着溯源侵蚀释放沙层蓄水,并随着沙层厚度的增加蓄水作用增强,因此,覆沙坡面的产流率在相对稳定阶段随着覆沙厚度的增加波动程度变大[1]。

对于产沙过程而言,黄土坡面的产沙过程波动范围较小并且变化趋势较为平稳,而覆沙坡面的产沙过程随着产流历时的增加表现出“单峰”或者“双峰”的变化趋势。在谢林妤等[18]的研究中,也得到了相同的结论。黄土坡面的侵蚀力主要是坡面径流冲刷的搬运作用,由于黄土表层松散颗粒较少,因此黄土坡面的产沙率较小[21]。而覆沙坡面的侵蚀力由径流冲刷的搬运作用、沙层蓄水的能量和沙层坍塌的重力三部分组成,覆沙坡面的侵蚀以溯源侵蚀为主,在坡面产流之前沙层储存水分,当能量足以启动坡面下部的沙层时,下部沙层边缘坍塌,沙源后退,表层沙粒提供了充足的物质来源,一旦发生侵蚀产沙率非常大[22]。随着试验的继续,坡面下方黄土坡面增大,当沙层被冲刷完后,侵蚀物质减少,因此产沙率迅速减小。

本研究虽然对不同覆沙和径流坡长条件下坡面的产流产沙特征进行了研究,但研究结论仍是初步探讨,还有待今后进一步的研究和完善:

(1)在土壤侵蚀过程中必然存在地形的变化,地形特征又间接作用于坡面的径流和侵蚀,在后续的研究中可以加入地形因子,进一步探究坡面径流泥沙与地形因子的相关关系。

(2)在室内进行模拟试验限制性因素较多,而野外实际条件更加复杂,在后续的研究中可以在野外进行调研,更加充分地考虑实际情况,选择合适的场地进行野外试验,结合室内模拟试验的研究成果进行进一步分析研究。

4 结 论

本文通过室内放水冲刷试验,在坡度、土壤前期含水量和放水流量一定的条件下,研究不同径流坡长和不同覆沙厚度对覆沙黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响,主要结论为:

(1)黄土坡面的初始产流时间在0.53~0.66 min之间,覆沙坡面的初始产流时间在1.8~4.18 min之间,覆沙坡面的初始产流时间明显延长。黄土坡面和覆沙坡面的产流量和产沙量峰值出现时间存在不同步性。

(2)黄土坡面和覆沙坡面产流率随产流历时的变化均可分为迅速增加和相对稳定2个阶段,覆沙坡面在相对稳定阶段产流率的波动程度大于黄土坡面。黄土坡面的产沙率随产流历时的延长变化趋势较为平稳,而覆沙坡面的产沙率波动范围较大。

(3)不同坡面的累积产沙量均随着累积产流量的增加而逐渐增加,两者之间呈幂函数关系,并且回归参数A和B均为产流产沙过程中的指示参数。

参考文献(References):

[1] 张建文, 李鹏, 高海东, 等. 覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 757−764. [Zhang Jian-

wen, Li Peng, Gao Haidong, et al. Response relationship between micro-relief variation and slope erosion under sand-covered conditions [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 757−764.]

[2] 唐克丽. 黄土高原生态环境建设关键性问题的研讨[J]. 水土保持通报, 1998, 18(1): 1−7. [Tang Keli. Discussion on key problem of eco-environment construction on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1998, 18(1): 1−7.]

[3] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000(11): 11−12. [Tang Keli. Importance and urgency of harnessing the interlocked area with both water and wind erosion in the Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2000(11): 11−12.]

[4] 许炯心. 黄河中游支流悬移质粒度与含沙量、流量间的复杂关系[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 39−48. [Xu Jiongxin. Complicated relationships between suspended sediment grain-size, water discharge and sediment concentration in tributaries of middle Yellow River [J]. Geographical Research, 2003, 22(1): 39−48.]

[5] Zhang F B, Bai Y J, Xie L Y, et al. Runoff and soil loss characteristics on loess slopes covered with aeolian sand layers of different thicknesses under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 244−251.

[6] 闫云霞, 许炯心. 黄河多沙粗沙区高含沙水流发生频率的空间分异及其与侵蚀产沙的关系[J]. 泥沙研究, 2010(3): 9−16. [Yan Yunxia, Xu Jiongxin. Spatial variation of hyperconcentrated flow frequency and its relationship with specific sediment yield in the high-intensity coarse sediment producing area of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Sediment Research, 2010(3): 9−16.]

[7] 邹亚荣, 张增祥, 王长有, 等. 中国风水侵蚀交错区分布特征分析 [J]. 干旱区研究, 2003, 20(1): 67−70. [Zou Yarong, Zhang Zengxiang, Wang Changyou, et al. Analysis on the distribution characteristics of the interleaving zones of water/wind erosion in china [J]. Arid Zone Research, 2003, 20(1): 67−70.]

[8] 海春兴, 史培军, 刘宝元, 等. 风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 50−52, 56. [Hai Chunxing, Shi Peijun, Liu Baoyuan, et al. Research status of wind and water double erosion and its main study content in future[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 50−52, 56.]

[9] 张庆印. 黄土高原沙黄土水蚀与风蚀交互作用模拟试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. [Zhang Qingyin. Simulation Experiment of Aeolian-Fluvial Inter Action of Loess Soil on the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.]

[10] 武秀荣. 片沙覆盖黄土区沙土二元结构坡面侵蚀过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. [Wu Xiurong. Studying Erosion Process of Aeolian Sand over Loess Surface in Hilly Region of the Loess Plateaue Covered by Aeolian Sand[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015.]

[11] 武秀荣, 张风宝, 王占礼. 片沙覆盖黄土坡面沙土二元结构剖面土壤物理性质变化研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 190−193, 210. [Wu Xiurong, Zhang Fengbao, Wang Zhanli. Variation of sand and loess properties of binary structure profile in hilly region covered by sand of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 190−193, 210.]

[12] 张丽萍, 唐克丽, 张平仓. 片沙覆盖的黄土丘陵区土壤水蚀过程研究[J]. 水土保持学报, 1999, 5(1): 41−46. [Zhang Liping, Tang Keli, Zhang Pingcang. Soil water erosion processes in loess hilly gully region covered with sheet sand[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 5(1): 41−46.]

[13] 张丽萍, 倪含斌, 吴希媛. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征实验研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 126−127. [Zhang Liping, Ni Hanbin, Wu Xiyuan. Soil water erosion processes on sloping land with different material in the wind-water interaction zone in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 126−127.]

[14] 惠振江. 陕北毛乌素沙地与黄土区过渡地带荒漠化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001. [Hui Zhenjiang. Desertification in the Transition Zone between Mowusu Sandy Land and Loess Hill Region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2001.]

[15] 汤珊珊, 李占斌, 任宗萍, 等. 覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 25−28. [Tang Shanshan, Li Zhanbin, Ren Zongping, et al. Experimental study on the process of runoff and sediment yield on sand-covered slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 25−28.]

[16] Su Y Y, Li P, Ren Z P, et al. Slope erosion and hydraulics during thawing of the sand-covered Loess Plateau[J]. Water, 2020, 12(9): 2461.

[17] Zhang F B, Yang M Y, Li B B, et al. Effects of slope gradient on hydro-erosional processes on an aeolian sand-covered loess slope under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 447−456.

[18] 谢林妤, 白玉洁, 张风宝, 等. 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 60−72. [Xie Linshu, Bai Yujie, Zhang Fengbao, et al. Effects of thickness and particle size composition of overlying sand layer on runoff and sediment yield on sand-covered loess slopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 60−72.]

[19] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74: 2523−2530.

[20] Wang T, Li P, Liu Y, et al. Experimental investigation of freeze-thaw meltwater compound erosion and runoff energy consumption on loessal slopes[J]. Catena, 2020, 185: 104310.

[21] 张辉, 李鹏, 汤珊珊, 等. 多场次降雨条件下覆沙坡面的径流产沙特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2016(6): 59−65. [Zhang Hui, Li Peng, Tang Shanshan, et al. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on sand-covered slope under the condition of repetitive rainfall[J]. Journal of Sediment Research, 2016 (6): 59−65.]

[22] 汤珊珊, 李占斌, 李聪, 等. 模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 139-146. [Tang Shanshan, Li Zhanbin, Li Cong, et al. Runoff and sediment yield process on sand covered slope under simulated rainfall [J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2016, 44(5): 139-146.]

Runoff and sediment yield and relationship between water and sediment of sand covered slope of loess hilly region

SU Yuanyi[1,2], FENG Zhaohong[3], ZHANG Yang[1], LEI Na[1], ZHANG Tingyu[1]

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China)

Abstract: The characteristics of runoff and sediment and runoff-sediment relationship under four overlying sand conditions and three runoff slope length conditions were studied by indoor water discharge scoring tests. Results showed that the initial runoff time of the sand-covered slope was significantly longer than that of the loess slope, and the initial runoff time increased with the increase of sand-covered thickness. In addition, the unsynchronized time of peak runoff and sediment was found. The runoff rate of different slopes was small at the beginning of the test, and it gradually increased and stabilized with the extension of the runoff time. The sediment rate of the loess slope had a stable trend with the extension of runoff time, whereas the sediment rate of the sand-covered slope had a larger fluctuation range. The accumulated sediment on different slopes increased gradually with the increase of accumulated runoff, and a power function relationship was observed between them. The sand layer had a certain water storage function; thus, the erosion process of the sand-covered slope was evidently different from that of the loess slope. The thickness of the sand cover is an important factor affecting the erosion characteristics of the slope, which provides a scientific basis for further study of the erosion characteristics of the composite slope.

Keywords: loess; sand covered slope; runoff and sediment yield; runoff-sediment relationship